



论 文

“强冲击载荷下钢筋混凝土的本构关系、破坏机理与数值方法”专辑

基于软材料的 SHPB 波形整形技术

陈刚*, 张青平, 黄西成

中国工程物理研究院总体工程研究所, 绵阳 621999

* E-mail: chengang@caep.cn

收稿日期: 2015-11-28; 接受日期: 2016-02-03; 网络出版日期: 2016-03-16

国家自然科学基金(批准号: 11390361, 11572299)资助项目

摘要 脉冲整形常被用来修正霍普金森压杆的入射波形, 以保证加载过程中试件的应力均匀性和恒应变率。本文提出了一种具有较好的波形整形效果和较宽适用范围的分离式霍普金森压杆(SHPB)入射波整形方法。采用真空封泥这种可忽略强度的材料作为入射波的波形整形器, 结合撞击速度调整封泥的用量, 可以得到正弦函数及缓升平台的类梯形波等不同的整形效果。数值模拟分析表明, 真空封泥的波形整形效应主要由材料变形过程中的径向惯性效应控制。应用实例显示, 经波形整形的 SHPB 实验试件两端的应力平衡得到较大的改善。

关键词 SHPB, 波形整形器, 真空封泥, 脆性材料

1 引言

分离式霍普金森压杆(SHPB)技术用于获得材料在 $10^2\sim10^4\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的应力-应变曲线。SHPB 系统自 1949 年 Kolsky 提出以来, 已被广泛运用于测试多种材料(如金属、陶瓷、岩石、混凝土、复合材料、聚合物和泡沫材料等)在高应变率下的力学响应。

经典的 SHPB 技术中, 撞击杆与输入杆间发生弹性共轴碰撞获得入射脉冲。实验的波形无法调整, 同时也存在较大的高频振荡, 影响实验精度。特别对一些脆性材料来说, 还可能导致试件在未达到均匀变形时就发生了破坏。为了减小波传播过程中的弥散效应, 保证实验时试样中的应力平衡和变形均匀, 以及实现常应变率加载, 研究者发展了 SHPB 的波形整形技术, 通过改变子弹形状^[1~5]或在输入杆前端安装

垫片作为整形器, 实现对入射波的改变。由于子弹形状的特殊性带来了设计和加工的困难, 采用垫片的方式得到更广泛的应用。其中垫片材料有紫铜^[6,7]、黄铜^[8]、橡胶^[9,10]等, 还有直接用试件作为整形器^[5], 以及组合整形器^[11]等。宋博等人^[12]对此进行了详尽的总结。

上述研究中, 波形整形器均采用具有一定强度的金属或非金属材料, 由于不同试件材料甚至同一材料的不同应变率实验所需的波形整形特征有所差异, 对每类实验均需进行整形器的尺寸设计和机械加工, 给实验带来不便之处。在 SHPB 实验过程中, 我们发现采用真空封泥这种可忽略强度的材料作为入射波的波形整形器, 结合撞击速度和用量, 可以方便地调整入射波形, 获得理想的效果。入射波不但非常光滑, 重复性也相当好, 具有较好的波形整形效果。

引用格式: 陈刚, 张青平, 黄西成. 基于软材料的 SHPB 波形整形技术. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 393~399
Chen G, Zhang Q P, Huang X C. Pulse shaping with soft material for SHPB (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 393~399, doi: 10.1360/N092015-00368

和较宽的适用范围。本文对相关实验结果、数值模拟以及一些应用实例进行介绍。

2 软材料整形实验结果

SHPB 实验系统主要包括撞击杆、输入杆、试件、输出杆、吸收杆以及测量系统和数据处理系统等，试件在输入杆和输出杆之间，实验装置如图 1 所示。传统 SHPB 实验系统采用撞击杆直接撞击输入杆，在杆上得到的入射波脉冲为近似矩形，波形平台幅值由撞击速度决定，宽度由撞击杆长度决定，具有较短的上升沿，波形在平台幅值上有较大的振荡。而入射波整形技术在输入杆撞击端安装整形器，撞击杆首先接触到整形器。在撞击过程中，整形器发生大变形，进而改变撞击过程中的载荷以及相应的入射波形，从而实现减缓入射波上升沿、减小高频振荡，实现加载过程中的试件变形均匀和应力平衡等效果。

真空封泥是一种工业产品，主要用于真空设备经常拆卸部分的临时性密封，真空封泥是由高黏度、低蒸汽压、高沥青含量的精制石油脂与高山黏土机械搅拌而成的，是一种黑色泥状的物体，它具有可塑性好，在空气中不易干燥，性能稳定的特点。相对于 SHPB 实验中入射波的应力幅值来说，真空封泥的强度可以忽略不计。

图 2 为直径 50 mm 的 SHPB 装置照片以及输入杆端部放置真空封泥整形器的情形，SHPB 的撞击杆

长度为 300 mm。实验中，将一定量的真空封泥团成球形，测量其直径以确定所使用的量(也可通过天秤量确定)，再将其放置于输入杆前端面中心，并压成半球形作为整形器。在撞击完成后观察撞击杆与输入杆的接触端面可见，当用量较少时，封泥在端面被压成薄饼状；随着用量的增加，薄饼面积相应增大；当封泥超过一定量后，封泥将飞出撞击面。在没有遮挡的状态下，可在撞击面四周的墙壁及房顶观察到飞出的封泥材料，表明材料具有较高的速度。

表 1 和图 3 给出了在 50 mm 直径 SHPB 系统上开展实验时，在 2 种封泥直径和 3 种撞击速度下经过整形的入射波形测试曲线，图 3 同时给出了没有整形的入射波形。由图可见，在没有整形时，入射波形的上升沿时间约为 19 μs (最大幅值的 10%~90%)。在图 3 中上升沿最长的波形(s-3)的相应时间约为 120 μs 。真空封泥可对入射波形产生明显的整形效果，整形后的入射波宽度比无整形器时上升沿明显减缓，整个波形拉宽，波形光滑。

从图 3 同时可见，在相同的封泥用量情况下，随着撞击速度的提高，入射波形的幅值增加的同时，入射波上升沿的及整个入射波形的脉冲宽度均随之减小，并逐渐发生波形的改变。如 s-2 与 s-3 相比，撞击速度提高 36%，相应的波形最大幅值提高 75%，上升沿时间(最大幅值的 10%~90%)减小约 30 μs 。另一方面，在相同的撞击速度时，随着整形器材料用量的改变，波形的上升沿也随之变化，如 s-4 与 s-3 相比，整

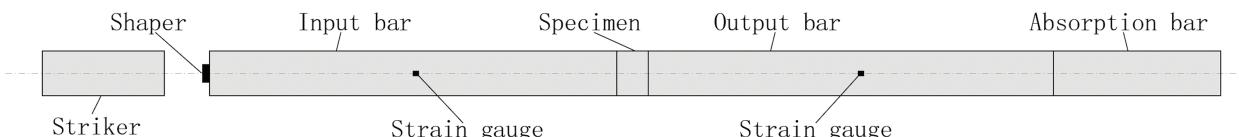


图 1 SHPB 实验装置示意图

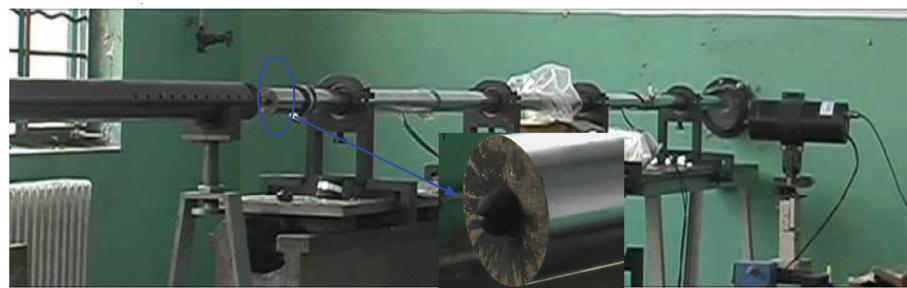
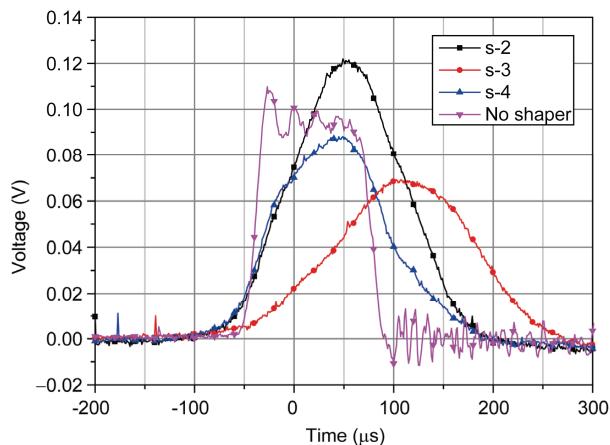


图 2 (网络版彩图)50 mm 直径 SHPB 系统及波形整形器

表 1 50 mm 直径 SHPB 装置的几种波形整形实验工况

编号	封泥直径(mm)	撞击速度(m s ⁻¹)
s-2	14	15
s-3	14	11
s-4	10	11

**图 3** (网络版彩图)50 mm 直径 SHPB 的几种整形工况下波形结果

形器直径由 14 mm 减小到 10 mm, 相应的波形幅值提高约 27%, 脉冲上升沿时间减小约 40 μs.

采用这种材料作为波形整形器, 其用量在实验中可以随时方便调整. 通过撞击速度和封泥用量二者结合调整, 可以得到正弦函数、缓升平台的类梯形波以及仅过滤高频振荡的方波等不同的整形效果, 以满足岩石类脆性材料或韧性材料的恒应变率等实验需求.

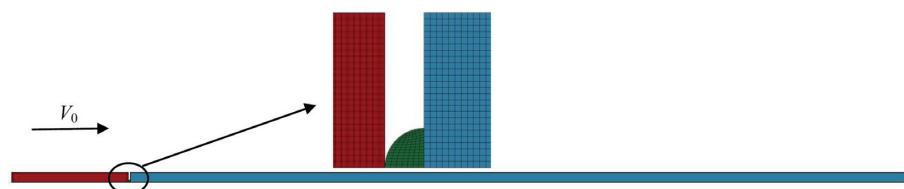
3 数值模拟分析

采用 LS-DYNA 对真空封泥的整形过程进行了

二维轴对称的有限元模拟, 数值模拟的几何模型和网格划分如图 4 所示, 包括撞击杆、输入杆和真空封泥脉冲整形器. 数值模拟中撞击杆和输入杆采用弹性材料模型描述, 采用钢的材料参数; 真空封泥采用弹塑性模型进行描述, 模量采用钢的 1%, 屈服应力相对于实验中杆中应力, 在 1‰量级. 材料参数如表 2 所示.

图 5 给出了数值模拟与实验测试曲线的对比, 二者的脉冲宽度相同, 在波形上也很接近, 表明分析模型可以反映真空封泥波形整形的主要特征. 两条曲线的差异可能与数值模拟中对材料的黏性反映不充分有关.

图 6 和 7 给出了波导杆与整形器在撞击过程中的接触载荷和几个典型时刻的整形器变形图像. 以图 3 所示的撞击杆与整形器接触为零时刻点, 在撞击后约 450 μs, 接触载荷曲线开始出现明显的上升; 在 630 μs, 载荷达到最大值; 在撞击后约 800 μs, 载荷归零. 结合图 5 和 6 可见, 在 400 μs 时, 整形器已出现很大变形, 但还没有产生明显的载荷; 在 500 μs 时, 整形器的厚度压缩量超过 80%, 而相应的载荷不到最大载荷的 5%; 在载荷达到最大值的 630 μs, 整形器已被压缩成很薄的薄片, 并且其直径已超过导杆直径. 这些图像表明, 整形器初始形状的细微变化对波形没有影响, 整形器在受到大幅压缩之后的变形受力情况主要影响实验波形; 实验后观察到, 在撞击杆和入射杆之间仅有薄薄的一层真空封泥, 大部分材料已飞溅而出. 由于在数值模拟中材料的强度取得很低, 除了材料本身的黏性效应外, 整形器承载能力的提高主要靠材料高速变形运动过程中的径向惯性效应^[13], 在整形器材料中出现多轴应力状态, 从而使材料在轴向可以承受更大的载荷.

**图 4** (网络版彩图)数值模拟几何模型**表 2** 数值模拟用材料参数

材料	密度(kg m ⁻³)	弹性模量(GPa)	泊松比	屈服应力(MPa)	强化模量(MPa)
杆	7800	210	0.3	-	-
真空封泥	1200	2.1	0.3	0.1	0.1

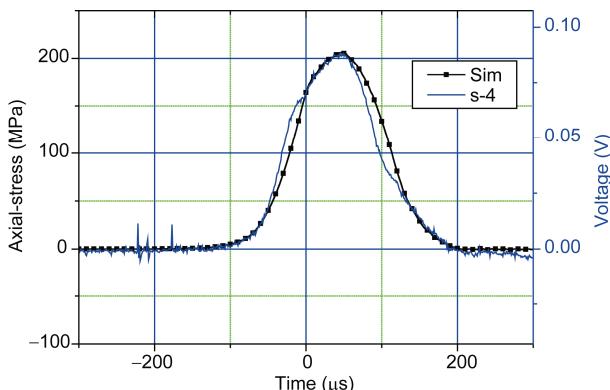


图 5 (网络版彩图) 数值模拟波形与实验对比

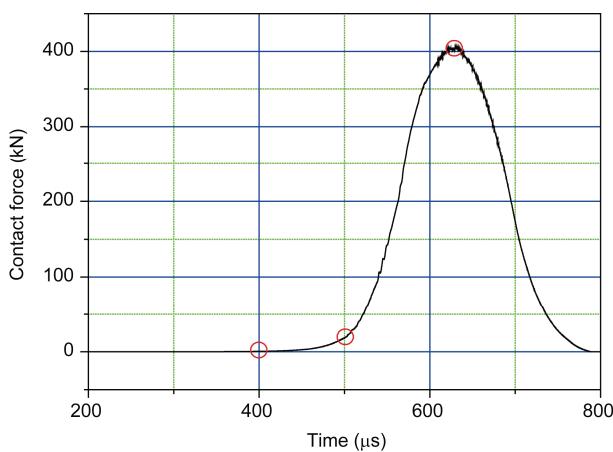


图 6 (网络版彩图) 导杆与整形器间的接触载荷

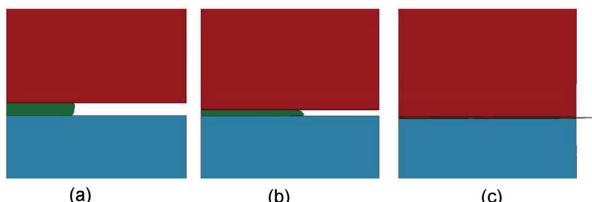


图 7 (网络版彩图) 撞击过程中的整形器变形图像

(a) 400 μs; (b) 500 μs; (c) 630 μs

4 运用实例

混凝土是一种在土木工程和防护工程中广泛使用的材料，在外部载荷作用下，具有较明显的脆性破坏特征。花岗岩材料含有不同粒度的石英、云母、斜长石、角闪石等多种成分，是一种材质较不均匀的多种矿物的混合体。两种材料的破坏应变均很小，高应变率实验时试件达到破坏应变的历时非常短，如果

采用传统的矩形入射波加载，试件可能会在应力还未达到均匀时及发生破坏。同时入射波头的高频振荡将严重影响实验的精度。在这两种材料的 SHPB 实验中均采用了上述波形整形技术，以下对其中的整形效果进行简介。

混凝土 SHPB 实验中，采用直径 120 mm，长 800 mm 的铝质撞击杆，直径 120 mm，长 6000 mm 的铝质波导杆。试件尺寸为直径 120 mm，高 100 mm。图 8 给出了安装整形器后的波导杆端部以及试件的安装情况。杆端外套白色圆筒对飞出的缓冲器材料起遮挡作用。

图 9 给出了带波形整形和无波形整形两种状态下混凝土 SHPB 实验测试波形的比较。两发实验的撞击杆速度均为 15 m s^{-1} 。由图可见，波形整形完全消除了入射波形的振荡，从而得到的透射波和反射波均较为光滑。当然，由于增加了波形整形器，入射波的幅值较无整形器工况有所下降，从而在相同的撞击条件下，实验的应变率有所下降。通过反射波与入射波叠加后的曲线与透射波比较，图 10 进一步给出了图 9 两发实验条件下的试件两端面应力平衡检验，由图可见，在未整形的实验中，达到最大应力值附近及以后，试件两端的应力出现较大的差异，其中，两端峰值差异约 30%，试件两端的应力平衡很难满足。而进行波形整形后的曲线显示，在整个加载过程中，均具有较好的应力平衡，其两端峰值差异约 2%。对入射波进行整形后，可以明显改善混凝土 SHPB 实验的应力平衡状态。

花岗岩的 SHPB 实验中，采用直径为 50 mm 的钢质导杆开展花岗岩的动态压缩实验。图 11 给出了运用前述真空封泥波形整形技术的动态压缩实验测试波形。入射波经过整形后形状近似为半正弦，入射波上升沿宽度将近 150 μs，波形光滑平整。透射波形

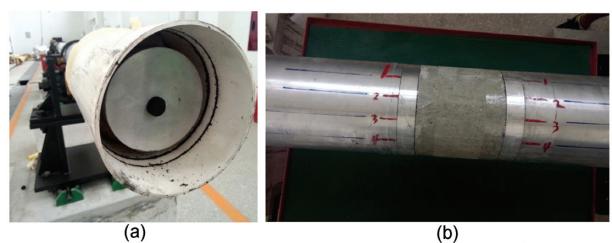


图 8 (网络版彩图) 120 mm 直径 SHPB 实验的整形器和混凝土试件安装情况

(a) 整形器及防护套筒; (b) 试件安装状态

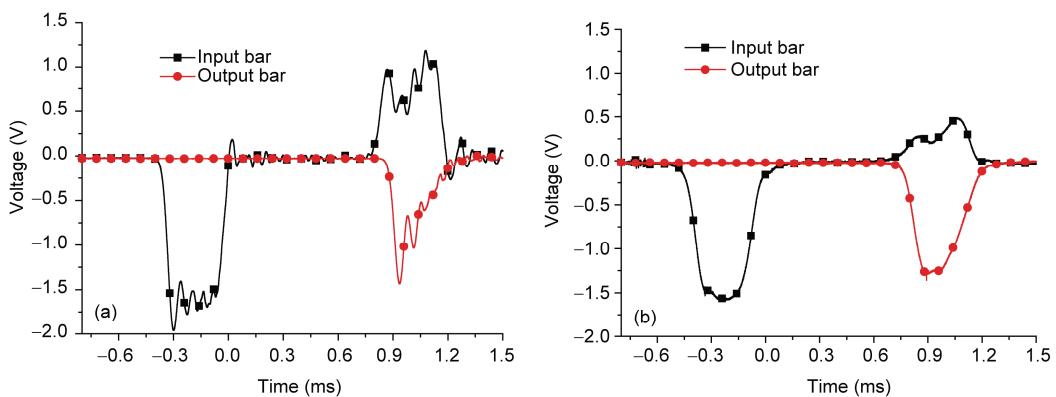


图 9 (网络版彩图)混凝土 SHPB 实验测试波形比较

(a) 未整形; (b) 带波形整形

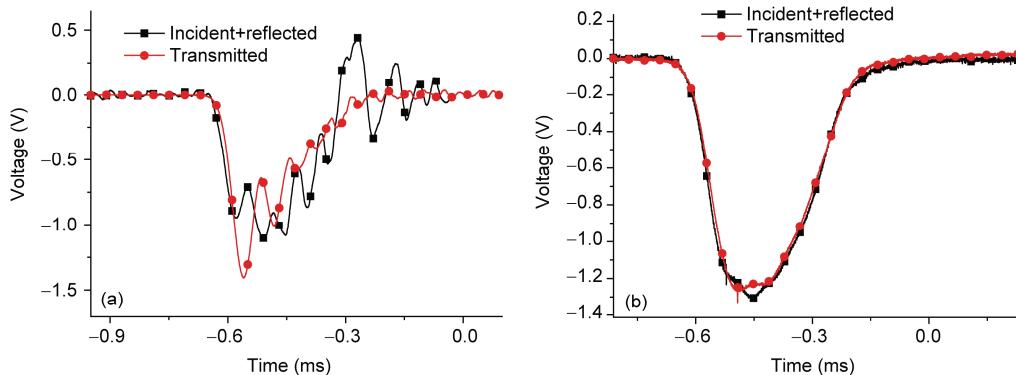


图 10 (网络版彩图)混凝土 SHPB 实验试件两端应力平衡检验

(a) 未整形; (b) 带波形整形

的上升沿宽度超过 $100 \mu\text{s}$, 在较长的加载时间作用下, 实验过程中试件应力的均匀性可以得到较充分的满足。从图 11(a)中两条竖线间的反射波和透射波形可以看出, 在透射波幅值增加的实验加载过程中, 反射波的幅值基本处于一个平台水平, 表明在试件破坏前的大部分加载过程中, 试件变形的应变率基本恒定。将图 11(a)中测试波形的入射波与反射波叠加, 再与透射波比较如图 11(b)所示, 表明经过波形整形后的花岗岩 SHPB 实验过程中具有很好的应力平衡效果。

5 结论

提出了一种 SHPB 入射波整形方法, 采用真空封泥这种可忽略强度的材料作为入射波的波形整形器, 通过调整整形器材料的量, 可以对标准 SHPB 实验入

射波形进行滤波和整形。采用这种波形整形方法简便易行, 可以获得较好的波形整形效果。

数值模拟表明, 整形器初始形状的细微变化对入射波形没有明显的影响, 整形器在受到大幅压缩之后的变形受力情况是影响实验波形的主要因素; 由于在数值模拟中材料的强度取得很低, 在撞击过程的后段整形器材料具有很高的运动速度。整形器传递轴向载荷的能力主要由材料高速变形运动过程中的径向惯性效应控制, 在整形器材料中出现多轴应力状态, 从而使材料在轴向可以承受更大的载荷。

通过应用实例表明, 采用这种波形整形技术可以明显改善脆性材料 SHPB 实验中试件两端的应力平衡性, 并可在一定程度上也可实现恒应变速率加载。

数值模拟中采用强度很低的弹塑性材料描述波形整形器获得了跟实验一致的曲线, 表明具有类似

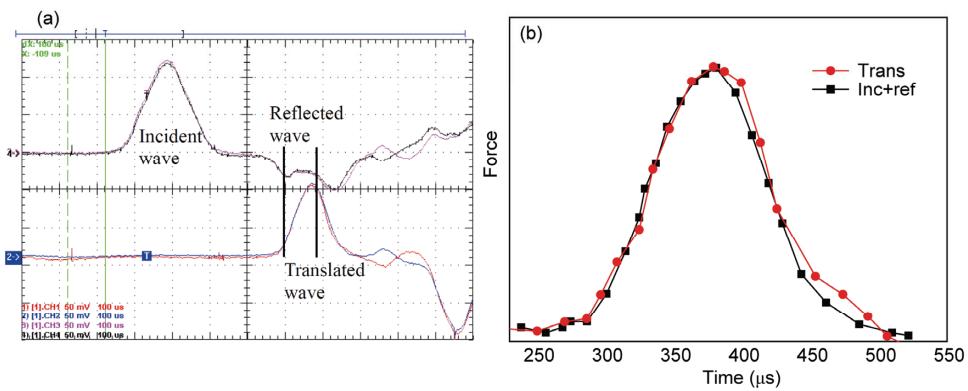


图 11 (网络版彩图)花岗岩 SHPB 实验典型测试曲线及应力平衡检验

(a) 测试曲线; (b) 应力平衡

性能的软材料也可达到同样的整形效果。该方法具有较宽适用范围,既可用于脆性材料 SHPB 实验的波

形整形,也可用于韧性材料 SHPB 实验中的高频滤波和恒应变率实验。

参考文献

- Christensen R J, Swanson S R, Brown W S. Split-Hopkinson-bar tests on rocks under confining pressure. *Exp Mech*, 1972, 12: 508–513
- 李夕兵, 陈寿如, 古德生. 岩石在不同加载波下的动载强度. *中南矿冶学院学报*, 1994, 25: 301–304
- Lok T S, Li X B, Liu D, et al. Testing and response of large diameter brittle materials subjected to high strain rate. *J Mater Civil Eng*, 2002, 14: 262–269
- 张方举, 陶俊林, 田常津. 变截面弹丸在分离式 Hopkinson 压杆中的应用. *实验力学*, 2003, 18: 137–140
- 陶俊林, 田常津, 陈裕泽, 等. SHPB 系统试件恒应变率加载实验方法研究. *爆炸与冲击*, 2004, 24: 413–418
- 王永刚, 施绍裘, 王礼立. 采用改进的 SHPB 方法对泡沫铝动态力学性能的研究. *实验力学*, 2003, 18: 257–264
- Frew D J, Forrestal M J, Chen W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar. *Exp Mech*, 2002, 42: 93–106
- 赵习金, 卢芳云, 王悟, 等. 入射波整形技术的实验和理论研究. *高压物理学报*, 2004, 18: 231–236
- 宋力, 胡时胜. 一种用于软材料测试的改进 SHPB 装置. *实验力学*, 2004, 19: 448–452
- Hsiao H M, Daniel I M, Cordes R D. Dynamic compressive behavior of thick composite materials. *Exp Mech*, 1998, 38: 172–180
- 张守保, 张磊. Φ100SHPB 应用现状和前景. 见: Hopkinson 杆实验技术研讨会会议论文集. 北京: 中国力学学会, 2007
- 宋博, 姜锡权, 陈为农. 霍普金森压杆实验中的脉冲整形技术. 见: 材料和结构的动态响应. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2005
- Chen G, Tao J L, Chen Z F, et al. Correction of lateral inertia effect in SHPB. *Int J Mod Phys B*, 2008, 22: 1045–1049

Pulse shaping with soft material for SHPB

CHEN Gang, ZHANG QingPing & HUANG XiCheng

Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China

In the split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiment, the state of dynamic stress equilibrium should be achieved over most of the test duration. Therefore, pulse shaping techniques which can modify the profile of the incident pulse are usually needed. In this paper, a new method for SHPB incident pulse shaping is presented. The vacuum cement material of which the strength can be ignored is used as the pulse shaper. The experimental results show that, with this method, satisfactory shaping effect can be obtained in a wide application scope. Combining the adjustment of the impact velocity and the amount of the vacuum cement, different shaping results such as sinusoid, slow-rise trapezoid can be obtained. This result would meet the needs of the dynamic stress equilibrium or constant strain rate loading in SHPB experiments. The numerical simulation result indicates that the shaping function of the material is mainly due to the radial inertial effect in the high velocity deformation process of vacuum cement.

SHPB, pulse shaper, vacuum cement, brittle material

doi: 10.1360/N092015-00368